

# 「超低周波電磁波ネットワークを用いた地震予知システムの開発」

早川 正士

株式会社早川地震電磁気研究所

研究題目：超低周波電磁波ネットワークを用いた地震予知システムの開発

研究報告：

超低周波電磁波とは、ULF (ultra-low-frequency, 周波数 10Hz 以下) と ELF

(extremely-low-frequency, 周波数 10Hz~3kHz) 帯の自然電磁波を指すものである。従来、地震に伴って、しかも前兆的に発生することがわかっている。三つの歴史的論文がある。時系列的には、(1) 1988 年の旧ソ連グルジア共和国でのスピタク地震 (マグニチュード(M)6.9) <sup>1,2)</sup>、(2) 1989 年米国カリフォルニア州ロマ・プリエタ地震 (M7.1) <sup>3)</sup>、(3) 1983 年グアム地震 (M8.3) <sup>4)</sup> という 3 つの地震に対して、前兆的 ULF 電磁波が発生していることが米国地球物理学会誌に掲載されている。その存在は認められ、世界各国 (日本をはじめ、ロシア、台湾、インドネシア、インド、米国など) においてこれら ULF 電磁放射を観測するネットワークが構築され、観測が続けられている。しかし、1 つの ULF センサーの感知範囲 (半径) は M6 で 70~80km、M7 で 100km と小さいため、事例の数はまだ 30 前後にとどまっている <sup>5)</sup>。

私たちは 1996 年~2001 年の国家プロジェクト地震フロンティアの際に、理研フロンティアと NASDA フロンティアの協力により、関東地区に ULF 電磁放射ネットワークを構築し、約 10 年間稼働した <sup>6)</sup>。しかし、関東地区の電磁状況は芳しくなく、良質のデータは夜間に限られた。更に、2014 年現在の状況としては、すべての機材は老朽化が著しく、関東ネットワークとしては、ほぼすべての観測点が停止している状況である。しかし、関東直下型地震、東海地震などが危惧されるので、関東 ULF ネットワークを再構築することが急務である。早川地震電磁気研究所は 4 台の高感度 ULF センサー (ウクライナ製) を購入しており、他機関と協力して、1 年以内に関東 ULF ネットワークを再構築する予定である。この再構築の基礎的データ解析と新しい信号処理法の開発が本助成によるものである。

本報告での主な研究成果は約 100 秒周期 (周波数 0.01Hz=10mHz) の ULF 放射 <sup>1,6)</sup>の他に、近年幾分高周波の ULF/ELF 放射も存在することが発見されている <sup>7)</sup>。今回の助成ではこの ULF/ELF 放射 (周波数 Hz~10Hz) に重点を置いて、解析を行った結果を報告する <sup>7,8)</sup>。論文 7)、8)の成果を報告する。

本研究助成では ULF/ELF 電磁放射の地震予知の有効性を検証するため、2 種類のデータ解析を行った。

(1) ロシアカムチャカでの観測データ

(2) 2011 年 3.11 の地震を対象として中部大学の ULF/ELF ネットワーク観測データ

解析手法として我々が最も重要だと考える偏波方位測定法を検証する。(1)のカムチャカ観測点での

結果は、Schekotov et al. (2013)<sup>7)</sup>に詳しく記しているのので、本報告では(2)の 2011 年 3.11 地震<sup>8)</sup>だけを紹介する。磁界水平 2 成分だけの情報に基づく手法である。ここでは、磁界水平 2 成分の振幅情報だけでなく、位相情報も活用することのものである。

ULF/ELF 放射の発生源の方向は受信点での磁界ベルトルの主軸の方向に垂直であることを利用する。 $\theta$  は磁界偏波の主軸と D 成分(東西)とのなす角とすると、

$$\tan(2\theta) = \frac{2A_h A_d}{A_d^2 - A_h^2} \cos(\varphi_h - \varphi_d)$$

ここで、 $A_h, A_d$  及び  $\varphi_h, \varphi_d$  は磁界水平成分の瞬時振幅と位相を示し、h は NS 成分、d は EW 成分を意味する。勿論、磁界強度が水平成分の平均値よりも 5 倍以上強い時だけ方位測定が可能となる。即ち、方位測定は振幅が充分の時 (S/N 比が充分大きい時) のみ可能であるので。

それでは、ULF/ELF 放射の検出について述べる。その検出には新しいパラメータ  $\Delta S$  を用いることとする。

$$\Delta S = \frac{\frac{P_{hh}}{P_{dd}} - 1}{rms(\tan \beta)}$$

分子は磁界水平 2 成分、 $P_{hh}$  (NS 成分) と  $P_{dd}$  (EW 成分) の比を表し、他方分母は磁界信号の偏波率を示している。上式での  $\beta$  は次式にて表現される。

$$\beta = \frac{1}{2} \arcsin \left\{ \frac{\text{Im}(P_{dh} - P_{hd})}{[(P_{hh} - P_{dd})^2 + 4P_{hh}P_{dd}]^{1/2}} \right\}$$

ここで、 $\text{Im}$  は虚部を表す。いろいろな因子を比較した結果、 $P_{hh}/P_{dd}$  のスペクトル振幅比の増加と楕円偏波率の減少が地震の前に発生することを発見しており、上記のパラメータが最も地震に対して感度がよいと結論している。楕円率、即ち磁界偏波パターンの短軸の長軸に対する比は  $\tan \beta$  で与えられる。 $\beta$  の符号が偏波情報を与え、 $\beta > 0$  が右廻り偏波、 $\beta < 0$  が左廻り偏波、そして直線偏波は  $\beta = 0$  に対応する。

電力スペクトル密度  $P_{hh}$ 、 $P_{dd}$  及び相互相関スペクトル密度  $P_{hd}$ 、 $P_{dh}$  はフーリエ変換を用いて周波数分解能 0.1Hz にて計算する。続いて、0.1~24Hz まで 1Hz 毎にスペクトル密度が計算される。 $\Delta S$  というパラメータの使用は、ロシア・カルチャカ観測点での多くの近隣地震に対する解析から、その重要性は確認されている。この手法を更に一般化するため、偏波パターンの回転軸を回転させる事により  $\Delta S$  の最大値を求める。すると、その楕円の径方向が電波源の方向となる。即ち、径方向成分  $P_{rr}$  と接線方向成分  $P_{tt}$  は次式にて求められる。

$$\Delta S(f) = \frac{\max \left\{ \frac{\langle P_{tt}(\phi_i, f, t) \rangle_t}{\langle P_{rr}(\phi_i, f, t) \rangle_t} \right\} - 1}{\langle rms(\tan \beta(f, t)) \rangle_t}$$

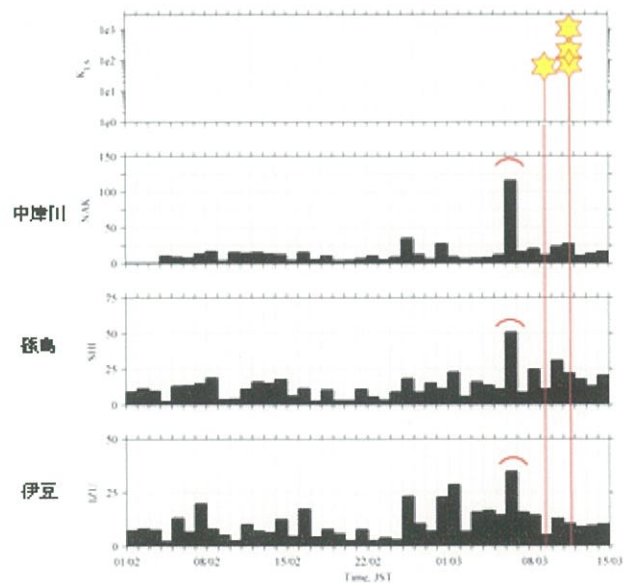
ここで、 $\phi_i$  は回転角を示し、 $30^\circ$  毎のステップにて変える。上式の  $\langle \rangle_t$  は夜間時間での平均値を作ることを意味する。 $P_{tt}$  及び  $P_{rr}$  は次式にて求められる。但し、 $\text{Re}$  は実部の意味である。 $\phi_i$  は回転角を示す。

$$P_{tt} = P_{hh} \cos^2 \phi_i + P_{dd} \sin^2 \phi_i + \text{Re}(P_{hd}) \sin 2\phi_i :$$

$$P_{rr} = P_{hh} \sin^2 \phi_i + P_{dd} \cos^2 \phi_i - \text{Re}(P_{hd}) \sin 2\phi_i :$$

前述した手法による実例を示そう<sup>8)</sup>。国内3観測点（中津川、篠島、伊豆）（中部大学ネットワーク）での観測データを用いた結果を図1、図2に示す。図1は最大 $\Delta S$ を示す周波数（9-10Hz）での $\Delta S$ の値を各観測点毎に示したもので、2011年3月6日に顕著なピークを示していることが理解される。即ち、ULF/ELF放射が発生している事を示している。これらのULF/ELF放射の電波到来方向を前述した方法により評価した結果を図2に示す。図より電波の発生源は3.11地震の震央方向を向いていることが判明し、3.11地震の前兆的ULF/ELF放射であると結論できよう。

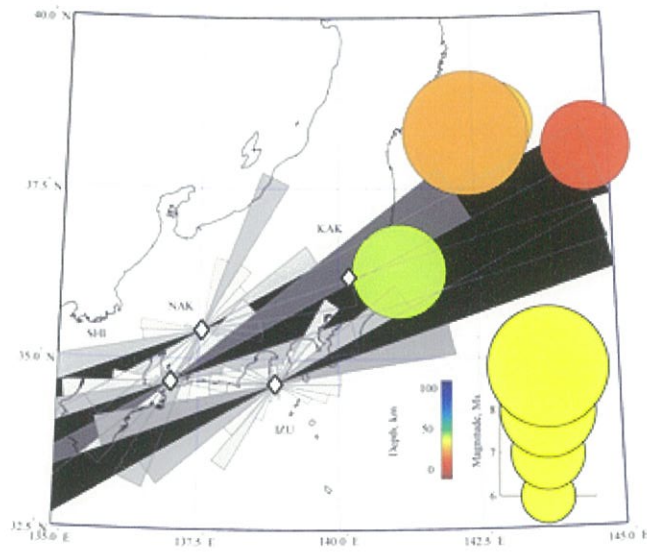
### 2011. 3.11 event



Temporal evolution of  $\Delta S$  (9-10Hz) at three observatories of Nakatsugawa, Shinojima and Izu during a longer period of February 1 to March 14.

図1 3観測点（中津川、篠島、伊豆）での $\Delta S$ の値の日変化を示す。

到来方向決定(中津川、篠島、伊豆観測点)



Azimuthal distributions of ULF/ELF radiation recorded on March 6 at three observatories of Nakatsugawa (NAK), Shinojima (SHI) and Izu (IZU). Positions of observatories are shown by diamonds. Magnitudes and depths of EQs are represented by size and color of circles.

(Ohta et al., Radio Science, accepted 2013)

図2 3観測点からのULF/ELF放射(3月6日)の到来方向を示した図。

結論として、次の2点を示す。

- (1)通常ULF放射の関東地区ネットワークの構築が急務である。
- (2)上記より幾分高周波のULF/ELF放射(周波数は10Hz前後)の存在が2011年3.11地震の前兆として3月6日に確認でき、更にその到来方向の評価から地震の前兆信号であることが確かめられた。今後、このULF/ELF放射は新しい現象として極めて有望である。

## 参考文献

- 1) Kopytenko, Yu. A., T. G. Matiashvily, P. M. Voronov, E. A. Kopytenko, and O. A. Molchanov, Detection of ULF emission connected with the Spitak earthquake and its aftershock activity based on geomagnetic pulsations data at Dusheti and Vardziya observatories, *Phys.Earth Planet. Intrer.*, vol.77, 85-95,1990
- 2) Molchanov, O. A., Yu. A. Kopytenko, P. M. Varonov, E. A. Kopytenko, T. G. Matiashvili, A. C. Fraser-Smith, and A. Bernardi, Results of ULF magnetic field measurements near the epicenters of the Spitak (M=6.9) and the Loma-Prieta (M=7.1) earthquakes: Comparative analysis, *Geophys. Res. Lett.*, vol.19, 1495-1498, 1992
- 3) Fraser-Smith, A.C., A. Bernardi, P.R. McGill, M.E. Ladd, R.A. Helliwell, and O.G. Villard, Jr., Low-frequency magnetic field measurements near the epicenter of the Ms 7.1 Loma Prieta earthquake, *Geophys. Res. Lett.*, vol.17, 1465-1468, 1990.
- 4) Hayakawa, M., R. Kawate, O. A. Molchanov, and K. Yumoto, Results of ultra-low-frequency magnetic field measurements during the Guam earthquake of 8 August 1993, *Geophys. Res. Lett.*, vol. 23, 241-244, 1996.
- 5) Molchanov, O. A., and M. Hayakawa, *Seismo Electromagnetics and Related Phenomena: History and latest results*, TERRAPUB, Tokyo, 189 p., 2008.
- 6) Hattori, K. ULF geomagnetic changes associated with major earthquakes. In “Earthquake Prediction Studies; Seismo Electromagnetics”, Ed. by M.Hayakawa, TERRAPUB, Tokyo, 129-152, 2013
- 7) Schekotov, A., E. Fedorov, O. A. Molchanov, and M. Hayakawa, Low frequency electromagnetic precursors as a prospect for earthquake prediction, in “Earthquake Prediction Studies: Seismo Electromagnetics”, Ed. by M. Hayakawa, TERRAPUB, Tokyo, 81-99, 2013.
- 8) Ohta, K., J. Izutsu, A. Schekotov, and M. Hayakawa, The ULF/ELF electromagnetic radiation before the 11 March 2011 Japanese earthquake, *Radio Sci.*, vol. 48, 589–596, doi:10.1002/ rds.20064, 2013.